

Н.К. Резниченко, д-р техн. наук, А.Я. Мовшович, д-р техн. наук,  
Н.Л. Шелкунова, Н.В. Попов, Харьков, Украина

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЕТАЛЕЙ**

*У статті розглянуті питання можливості створення індукційних пристроїв, що дозволяють формувати температурне поле деталі при розбиранні та складанні з'єднань за заданою схемою, що забезпечить контроль недопустимих температурних перепадів і механічної напруги.*

*В статье рассмотрены вопросы возможности создания индукционных устройств позволяющих формировать температурное поле детали при разборке и сборке соединений по заданной схеме, что обеспечит контроль недопустимых температурных перепадов и механических напряжений.*

N.K. REZNICHENKO, A.JA. MOVSHOVICH, N.L. SHELKUNOVA, N.V. POPOV  
TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF INDUCTOR CREATION FOR LOW-TEMPERATURE  
INDUCTION HEATING OF DETAILS

*In the article the questions of possibility of creation of induction devices are considered allowing to form the temperature field of detail at sorting out and assembling of connections on the set chart, that will provide control of impermissible temperature overfalls and mechanical tensions.*

### **Введение.**

Низкотемпературный индукционный нагрев деталей для сборки или разборки соединений – это прямой сквозной нагрев электропроводящего объекта переменным электромагнитным полем до температур не выше 400 °С. Создается поле индуктором, который представляет собой одно – или многовитковую катушку (или несколько катушек), включенную в цепь переменного тока. Электромагнитное поле может охватывать всю деталь или концентрироваться в ее части благодаря соответствующей конфигурации катушки и магнитопроводов.

Требования, предъявляемые к индуктору, индукционно-нагревательного устройства определяется технологической задачей – нагрев одного или нескольких типов деталей под сборку или разборку соединения, требуемой производительностью, конструктивными особенностями деталей и, при разборке, – доступом к ним. В общем случае, наилучшим индуктором для данной детали является индуктор, обеспечивающий ее нагрев с заданной скоростью и распределением температур по массе металла при минимальном энергопотреблении и максимальной надежности.

Надежность работы индукционного нагревателя, как системы, определяется надежностью входящих в него элементов. При этом наиболее ответственным элементом является индуктор, поскольку он является генератором электромагнитной энергии подверженным воздействиям температуры.

### **Постановка задачи**

Основными задачами стоящими перед разработчиками при создании индукционно-нагревательных устройств являются:

- Определение схем, принципов выбора типа, мощности, геометрических параметров индуктора, для создания в нагреваемой детали тепловых потоков, формирующих заданное температурное поле.

- Типизация индукционных нагревателей и их систем управления.

### **Изложение основного материала**

Физическая сущность индукционного нагрева состоит в том, что в материале, помещенном в переменное электромагнитное поле, создается электродвижущая сила, которая вызывает ток, генерирующий теплоту. При нагреве ферромагнитных материалов добавляется также тепло от эффекта гистерезиса. Условно считают, что вся энергия выделяется в поверхностном слое, толщина которого определяется глубиной проникновения тока. Глубина увеличивается с возрастанием температуры и уменьшением частоты тока. До температуры магнитных превращений металла (650-700°С) она остается практически одинаковой, и при промышленной частоте тока 50 Гц для стали, она составляет 5-7 мм. Из этого слоя тепло по массе материала детали распространяется теплопроводностью. При нагреве токами промышленной частоты может быть получена объемная мощность 0,8-1,0 кВт/см<sup>3</sup> и температура до 600°С.

Нагрев детали под сборку или разборку соединений может выполняться по нескольким принципиальным схемам. Наиболее распространенная – помещение нагреваемой детали или ее части непосредственно в электромагнитное поле индуктора (рис.1.1а). При этой схеме в наибольшей степени используется кольцевой эффект, состоящий в том, что во внутренней полости индуктора (катушки), где располагается деталь или ее часть, электромагнитное поле значительно сильнее, чем снаружи. Поле при этом концентрируется, главным образом, на наружной поверхности детали и, следовательно, ее нагрев происходит в основном от наружной поверхности. Нагрев по такой схеме является нагревом в продольном магнитном поле.

Чем меньше воздушный зазор между деталью и токопроводниками, тем эффективней используется электроэнергия, так как в меньшей степени рассеивается электромагнитное поле. При этом напряженность поля в воздушном зазоре является напряженностью магнитного поля на поверхности обмотки индуктора, а также на поверхности нагреваемой детали.

При схеме нагрева на магнитопроводе (рис.1.1б) деталь охватывает магнитопроводник замкнутой магнитной системы, образуя по существу вторичную обмотку трансформатора, первичная же обмотка – индуктор. Нагревается вся деталь с опережением зоны отверстия. Такая схема может использоваться только для нагрева деталей под сборку. Нагрев по этой схеме менее эффективен и к.п.д. индуктора ниже, чем по первой схеме.

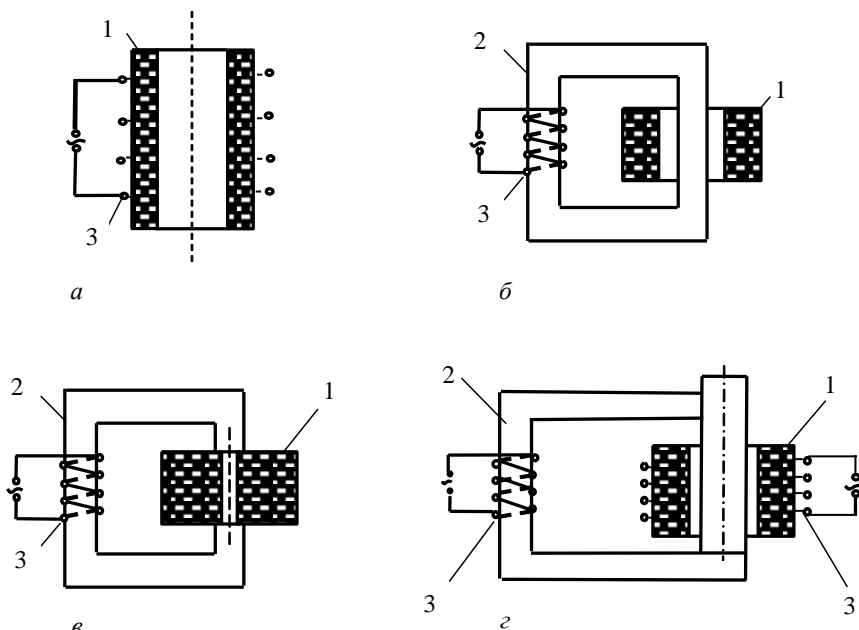


Рисунок – Схемы индукционного нагрева: а) индуктор охватывает деталь;  
 б) индуктор на замкнутом магнитопроводнике, проходящем через деталь;  
 в) индуктор на магнитопроводнике, замыкающемся на деталь; г) индуктор охватывает  
 деталь, находящуюся на замкнутом магнитопроводнике  
 1 – деталь; 2 – магнитопроводник; 3 – индуктор

В схеме нагрева детали, расположенной между магнитопроводами, так же как и в предыдущей схеме, используется замкнутая магнитная система (рис.1.1в). Контактирующие с деталью части магнитопроводящей системы могут перекрывать посадочное отверстие, тогда это нагрев под сборку или не перекрывать его, тогда это нагрев под разборку. Нагревается вся деталь, токами вызываемыми магнитным потоком, проходящим по магнитопроводу и, «сцепленным» как с нагреваемой деталью, так и с индуктором. Силовые линии потока как бы омывают внутреннюю и (или) наружную поверхности детали и нагревается вся деталь с опережением наружной поверхности. Нагрев по этой схеме имеет наименьшую эффективность по сравнению с предыдущими.

Нагрев по схеме (рисунок, г) в индукторе комбинированного типа, который впервые предлагается осуществлять, должен сочетать достоинства схем (рисунок а, б), улучшая равномерность нагрева детали при высокой его скорости. Нагрев по такой схеме будет исследоваться экспериментально.

Основой индукционного нагрева деталей, как отмечалось, является эффект, состоящий в том, что почти вся тепловая энергия выделяется в поверхностном слое металла толщиной, равной глубине проникновения поля. При

этом, как было показано, мощность для достижения максимального эффекта качества и энергосбережения, должна распределяться по поверхности нагреваемой детали не всегда равномерно. Поэтому расчет индуктора следует вести, используя, такой параметр, как генерируемая в нагреваемом объекте удельная мощность  $W_{уд}$ , то есть мощность, приходящаяся на единицу поверхности детали. Далее, используя решение полевой задачи электромагнитного поля предложить следующую схему расчета.  $W_{уд}$  определяется из выражения [1, 3]

$$W_{уд}=367 H_e^2 \sqrt{\rho \mu_e f},$$

где  $H_e$  – напряженность магнитного поля на поверхности нагреваемого слоя;  $\mu_e$  – относительная магнитная проницаемость слоя материала зависящего от  $H_e$ ;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $f$  – частота тока.

Отсюда находится напряженность магнитного поля, создаваемого индуктором в слое нагреваемой поверхности. Для определения  $\mu_e$ , а также  $H_e^2 \sqrt{\mu_e}$  используется кривая намагничивания стали  $B=f(H_e)$  – зависимость индукции от напряженности электромагнитного поля [1, 2]. Удельное сопротивление  $\rho$  материала зависит от температуры и находится в соответствии с

$$\rho=\rho_0 [1+\alpha_c (T-20)],$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление материала при 20°C;  $\alpha_c$  – температурный коэффициент сопротивления.

Для детали, находящейся на валу (соединение), площадь нагреваемой поверхности - это наружная поверхность. Для отдельно нагреваемой детали с отверстием в виде полого цилиндра, пластины с отверстием, нагреваемый слой будет расположен как на наружной поверхности, так и на внутренней. При этом, как отмечалось, на внутренней поверхности генерируемая мощность будет меньшей по величине, чем на наружной, если нагрев выполняется по схеме рис.1.1а, в и большей, если деталь нагревается по схеме рис.1.1б. По схеме рис.1.1г в зависимости от распределения мощности между индуктирующими катушками нагрев может быть одинаковым по обеим поверхностям детали. То есть такой подход к расчету индукционных систем может быть применен для всех указанных схем нагрева, при определении числа витков индуктора и тока в нем. Удельная мощность для последней схемы должна будет рассматриваться как суммарная по двум поверхностям.

Закон полного тока для магнитной цепи, которой является индуктор-деталь, определяет соотношение между ампервитками намагничивания  $I_u \omega$  индуктора и напряженностью магнитного поля  $H_e$

$$I_u \omega = H_e l_d, \quad (1)$$

где  $I_u$  – ток в индукторе;  $\omega$  – число витков в индукторе;  $l_d$  – длина нагреваемого участка детали.

Если индуктор имеет магнитопроводящую систему, то неоднородную магнитную цепь можно рассматривать как состоящую из двух последовательно соединенных участков

$$I_u \omega = H_e I_d + H_m I_d, \quad (2)$$

где  $H_d$  – напряженность магнитного поля в магнитопроводе.

Несмотря на имеющийся некоторый практический опыт, нет систематизированных знаний об эффективности использования рассмотренных схем для технологического нагрева различных по форме и размерам деталей, особенно в части энергозатрат, поэтому необходимы сравнительные экспериментальные исследования.

Индукционный нагрев изделия до заданной конечной температуры происходит при изменяющейся температуре на поверхности. Скорость изменения зависит от величины генерируемой в поверхности слое энергии в единицу времени, что определяется активной мощностью нагревателя. Можно выделить несколько характеристик режимов, которые не встречаются в совершенно чистом виде, но в определенной степени соответствуют режимам, имеющим место в практике.

Наиболее распространен простой случай нагрева – с постоянной во времени удельной мощностью. В тепловом расчете этого режима принимают, что глубина слоя, в котором выделяется тепло, неизменна во времени. В пределах слоя мощность источников тепла постоянна, а за его пределами равна нулю и тепло распространяется теплопроводностью без потерь в окружающую среду. Величина мощности принимается средней за период нагрева. При такой постановке задачи время нагрева до заданной температуры вычисляется однозначно, и распределение температуры по массе детали получают из уравнения Фурье с правой частью.

При большой мощности может возникнуть перепад температур в материале детали, который недопустим по техническим условиям, поэтому проверка распределения температур в этом случае необходима. С увеличением времени нагрева и уменьшением удельной мощности заметным образом сказываются потери тепла. Особенно они увеличиваются, если выполняется нагрев части детали (ступицы, зоны посадочного отверстия), поскольку часть тепла уходит в массу металла. Поэтому необходимо вводить поправку в рассчитанную мощность примерно в 20% от  $W$ .

Такой нагрев будет эффективен, если правильно подобрать к детали форму индуктора (или несколько индукторов) и нужным образом расположить концентраторы электромагнитного поля – магнитопроводы.

Более сложен нагрев при постоянной температуре поверхности. Он необходим в технологическом процессе, когда температура поверхности детали ограничена, например, поверхность закалена, или при разборке, когда надо сохранить снимаемую охватывающую деталь от перегрева. Такой режим нагрева в строгом его понимании осуществлен быть не может, так как в момент

включения индуктора его удельная мощность должна быть бесконечно большой. Практически температуру на поверхности детали следует поднимать быстро в течении промежутка времени, который значительно меньше, чем общая длительность нагрева, а затем температуру поддерживать постоянной. Этот режим приводит к меньшим тепловым потерям, чем предыдущий, с постоянной удельной мощностью.

Такой режим обеспечивается следующими методами: 1) регулирование мощности индуктора в процессе нагрева; 2) нагрев периодическим включением достаточно мощного индуктора до предельной температуры детали. Регулирование мощности сводится к ее постепенному уменьшению, а периодичность – поддержанием температуры поверхности в некотором диапазоне. При первом методе начальное значение удельной мощности значительно больше, чем конечное. При втором – удельная мощность постоянна, но циклична по времени. Вторым методом – циклическим включением индуктора (индукторов), обеспечивают приблизительно постоянную температуру поверхности, поскольку она изменяется от заданной до несколько меньшей. Такой нагрев называют также импульсным.

### **Выводы**

1. Систематизированы схемы индукционного технологического нагрева деталей для сборки и разборки соединений, и предложена новая схема нагрева, обеспечивающая равномерное распределение температур по радиусу осесимметричной детали при ее нагреве под сборку.

2. Методы нагрева реализуются программным управлением величины мощности во времени, программным управлением заданной мощности, либо управлением по температуре.

3. Методы управления могут сочетаться, если нагревается ответственное изделие. При любых режимах нагрева необходимо учитывать возможность возникновения недопустимых температурных перепадов в материале деталей, которые приведут к высоким напряжениям, особенно если деталь сложна по конфигурации.

**Список использованных источников:** 1. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1954. – 315 с. 2. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с. 3. Ключко В.А., Дука А.К., Резниченко Н.К. Нелинейная физико-математическая модель сборки соединений с натягом при использовании нагрева. // Вісник науки і техніки. Харків: НТУ «ХПІ» - 2005. -№4(23) – С.28-37.

*Поступила в редколлегию 15.03.2011*

**Bibliography (transliterated):** 1. Sluhockij A.E., Ryskin S.E. Induktory dlja indukcionnogo nagreva. – L.: Jenergija, 1954. – 315 s. 2. Sluhockij A.E., Ryskin S.E. Induktory dlja indukcionnogo nagreva. – L.: Jenergija, 1974. – 264 s. 3. Klocho V.A., Duka A.K., Reznichenko N.K. Nelinejnaja fiziko-matematicheskaja model' sborki soedinenij s natjagom pri ispol'zovanii nagreva. // Visnik nauki i tehniki. Harkiv: NTU «HPI» - 2005. -№4(23) – S.28-37.